



# 하늘의 수학자

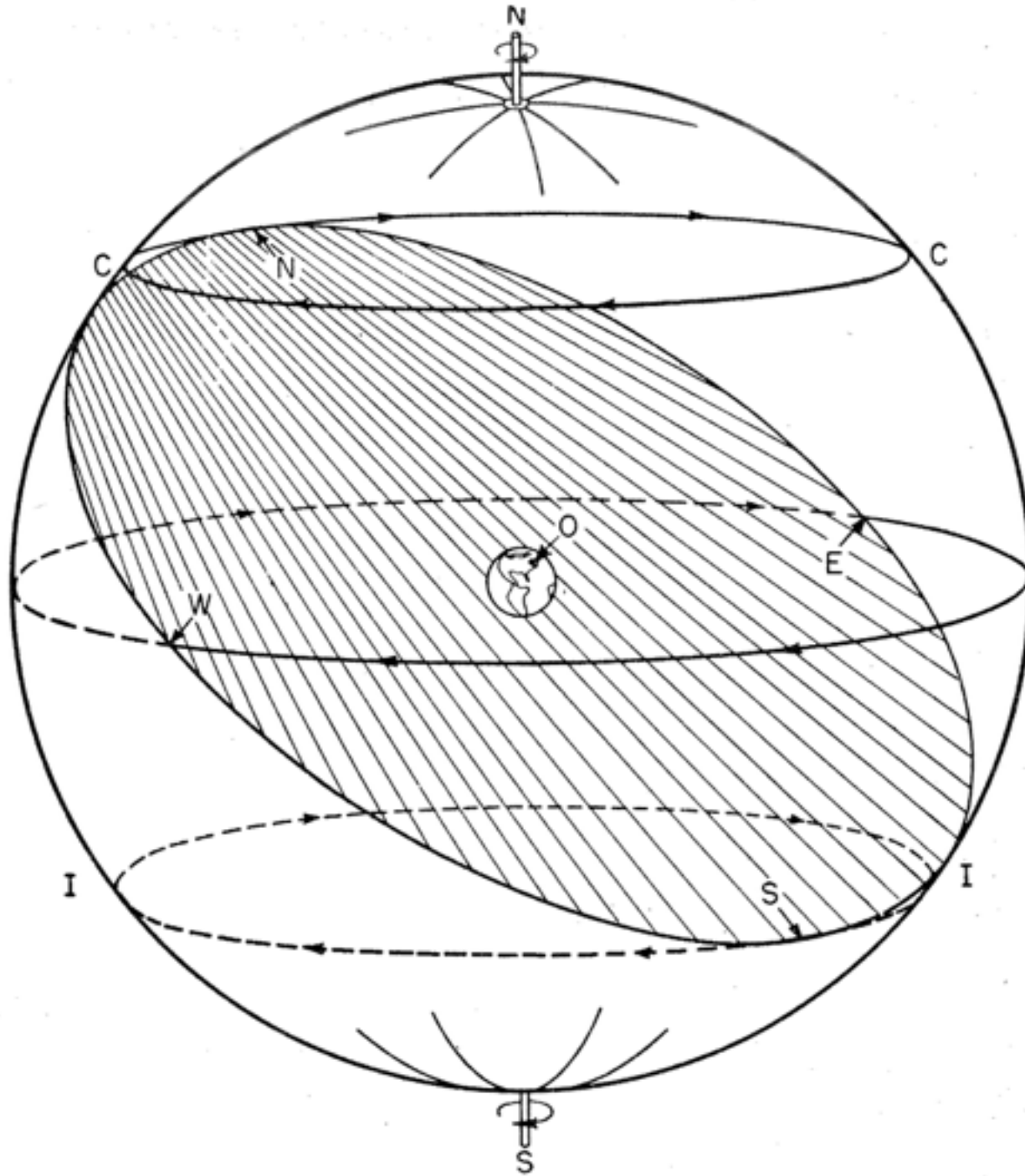
.....  
프톨레마이오스와 코페르니쿠스





# 고대의 지구/천구 체계

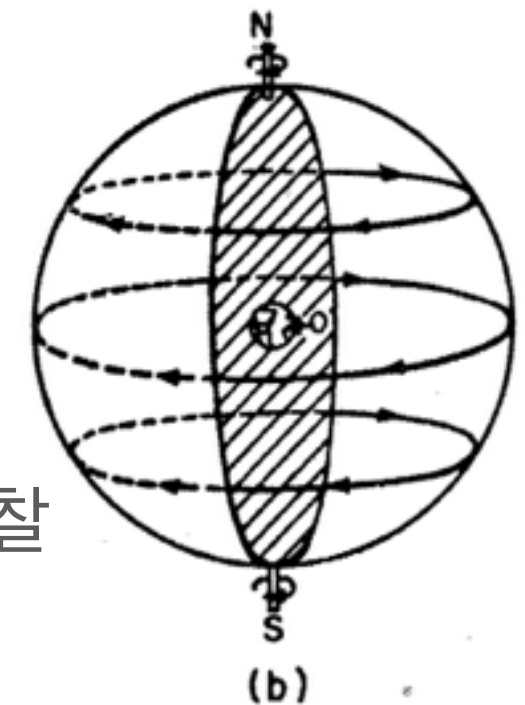
---



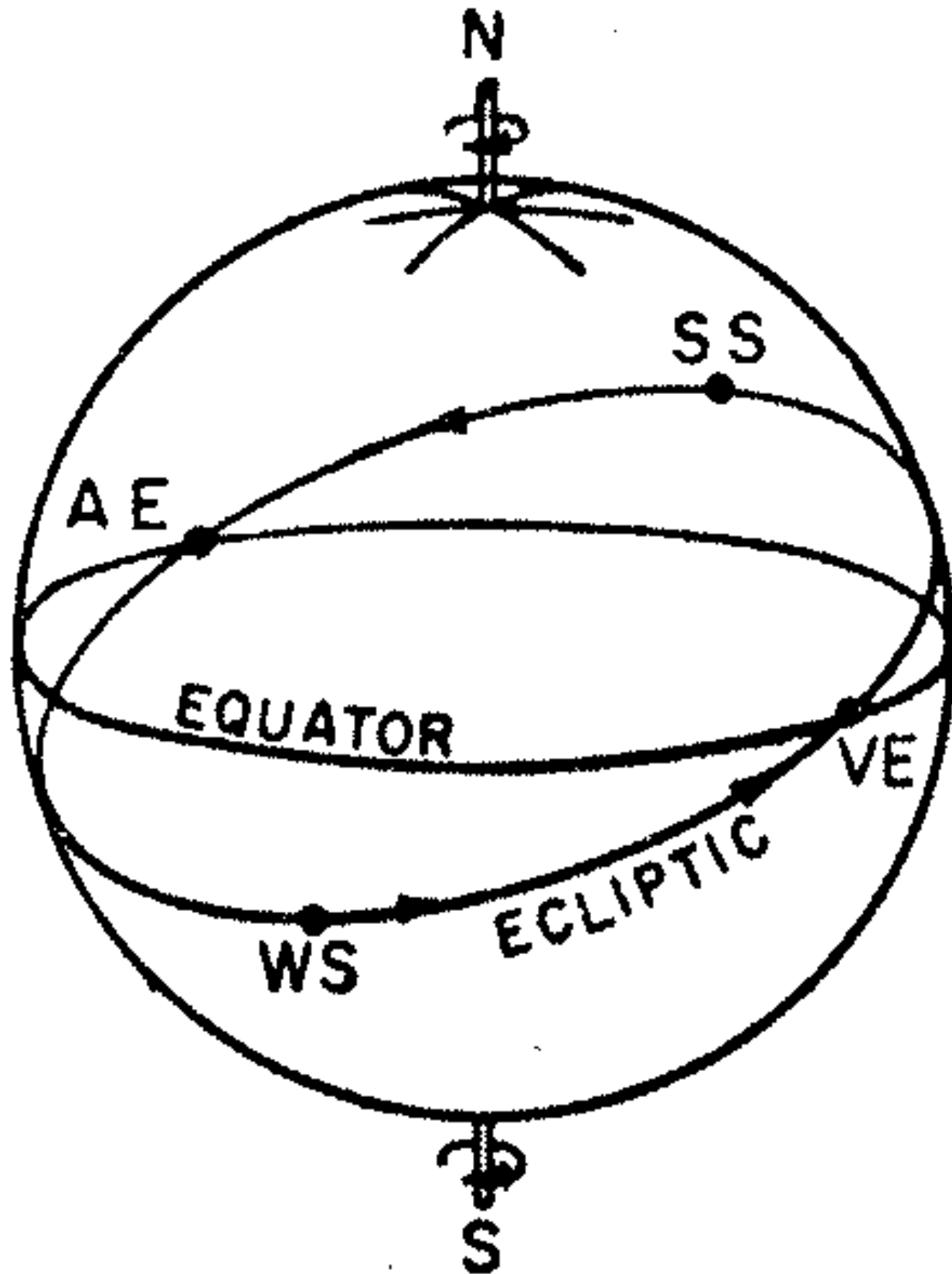
북반구 중위도 지역에서의 관찰



북극에서의 관찰



적도에서의 관찰

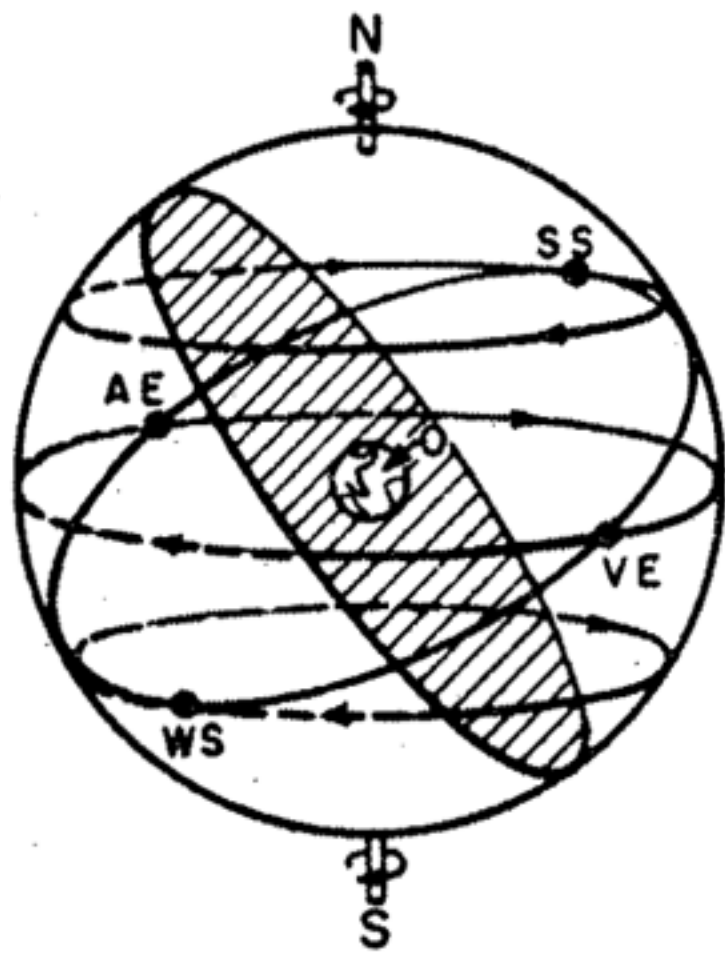


## 천구 위에서 움직이는 태양

.....

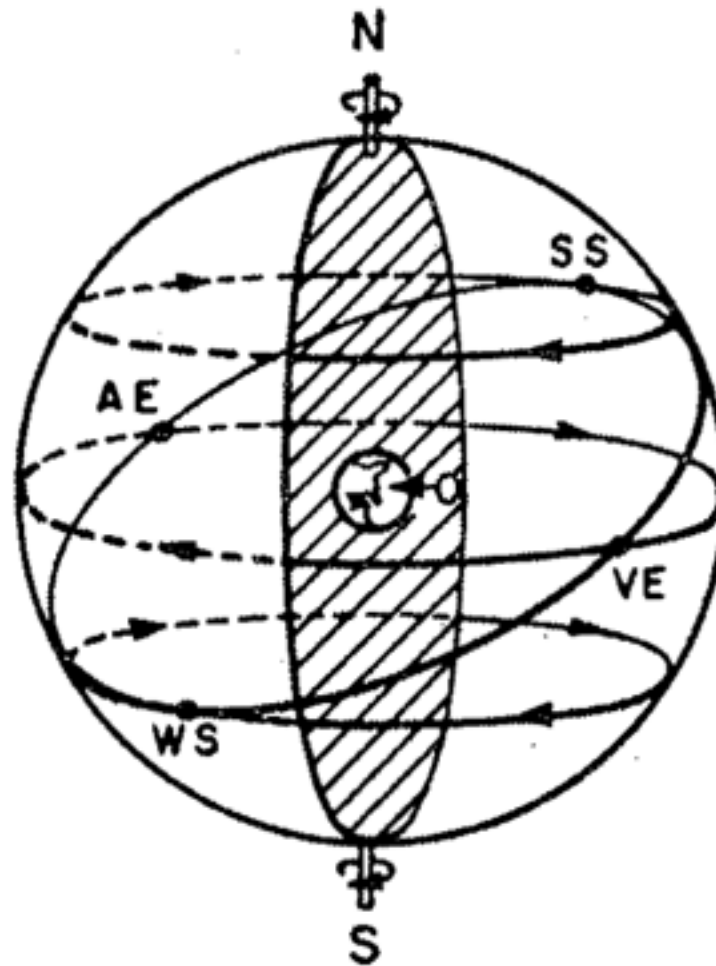
- ▶ 매일 태양은 천구 위에 고정된 별처럼 다른 별들과 함께 서쪽으로 한 바퀴를 돈다(일주운동).
- ▶ 그러나 태양은 천구 위의 '황도'라는 길을 따라 야금야금(하루에 약  $1^\circ$  씩) 동쪽으로 이동하여 1년에 한 바퀴를 완주한다(연주운동).

# 지구상의 다른 위치에서 관찰되는 태양의 운동



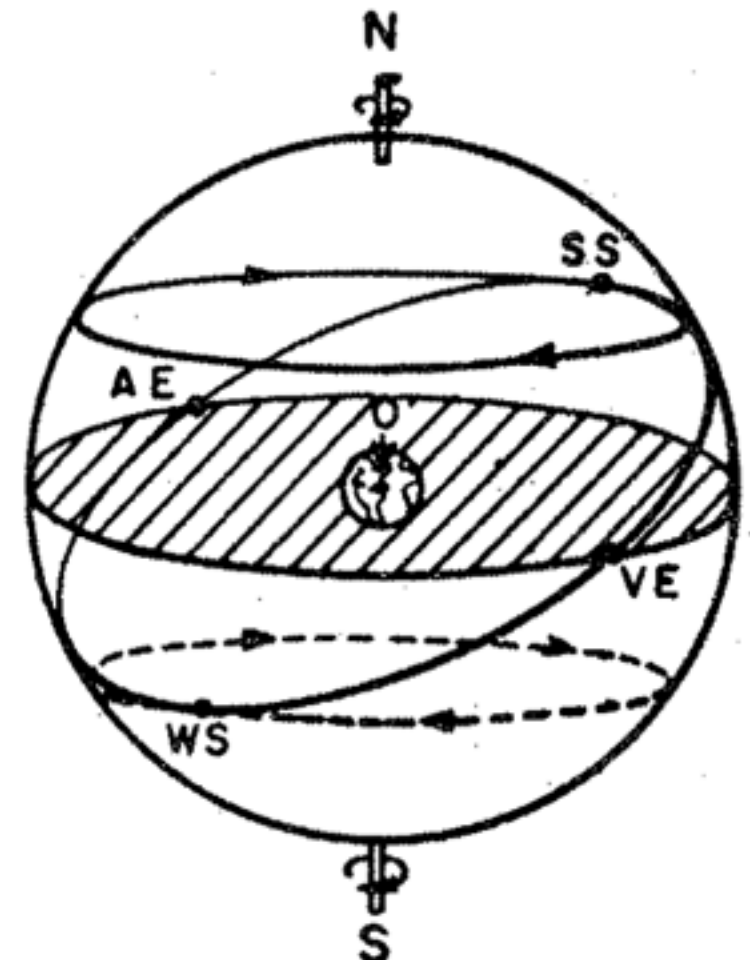
(a)

북반구의 중위도 지역



(b)

적도



(c)

북극



# 우주의 골칫거리 행성(떠돌이별)



달, 태양, 수성, 금성, 화성, 목성, 토성





## 7행성이 추가된 구형 우주

- ▶ 황도 한 바퀴를 도는 데 걸리는 시간이 짧을수록 작은 궤도
  - ▶ 달 : 평균 27.3일
  - ▶ 태양 : 1년
  - ▶ 수성 : 평균 1년 (역행 116일)
  - ▶ 금성 : 평균 1년 (584일)
  - ▶ 화성 : 평균 687일 (780일)
  - ▶ 목성 : 평균 12년 (399일)
  - ▶ 토성 : 평균 29년 (378일)





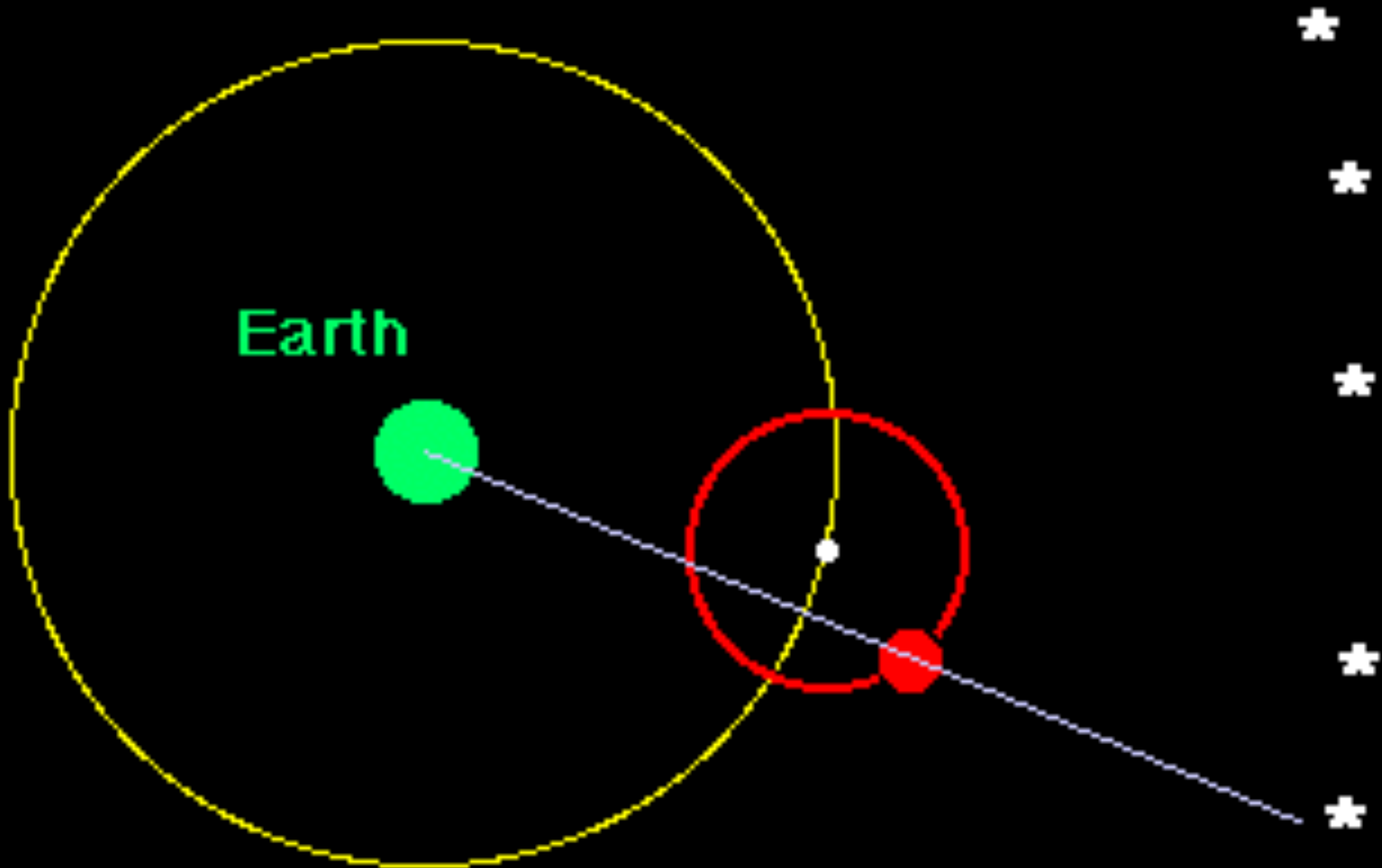
## 프톨레마이오스(AD 83?-168?)

.....

- ▶ 헬레니즘 시대의 알렉산드리아에서 활동한 수학자/천문학자/지리학자/점성술사
- ▶ 수리 행성 천문학 : 행성의 복잡한 운동을 원운동의 합성으로 정량적으로 설명 및 예측
- ▶ 행성의 정확한 위치를 예측해야 할 필요는 어디에 있었을까?
- ▶ 〈알마게스트〉, 〈지리학〉, 〈테트라비블로스〉 저술

# 주원-주전원 : 역행 운동과 밝기 변화의 설명

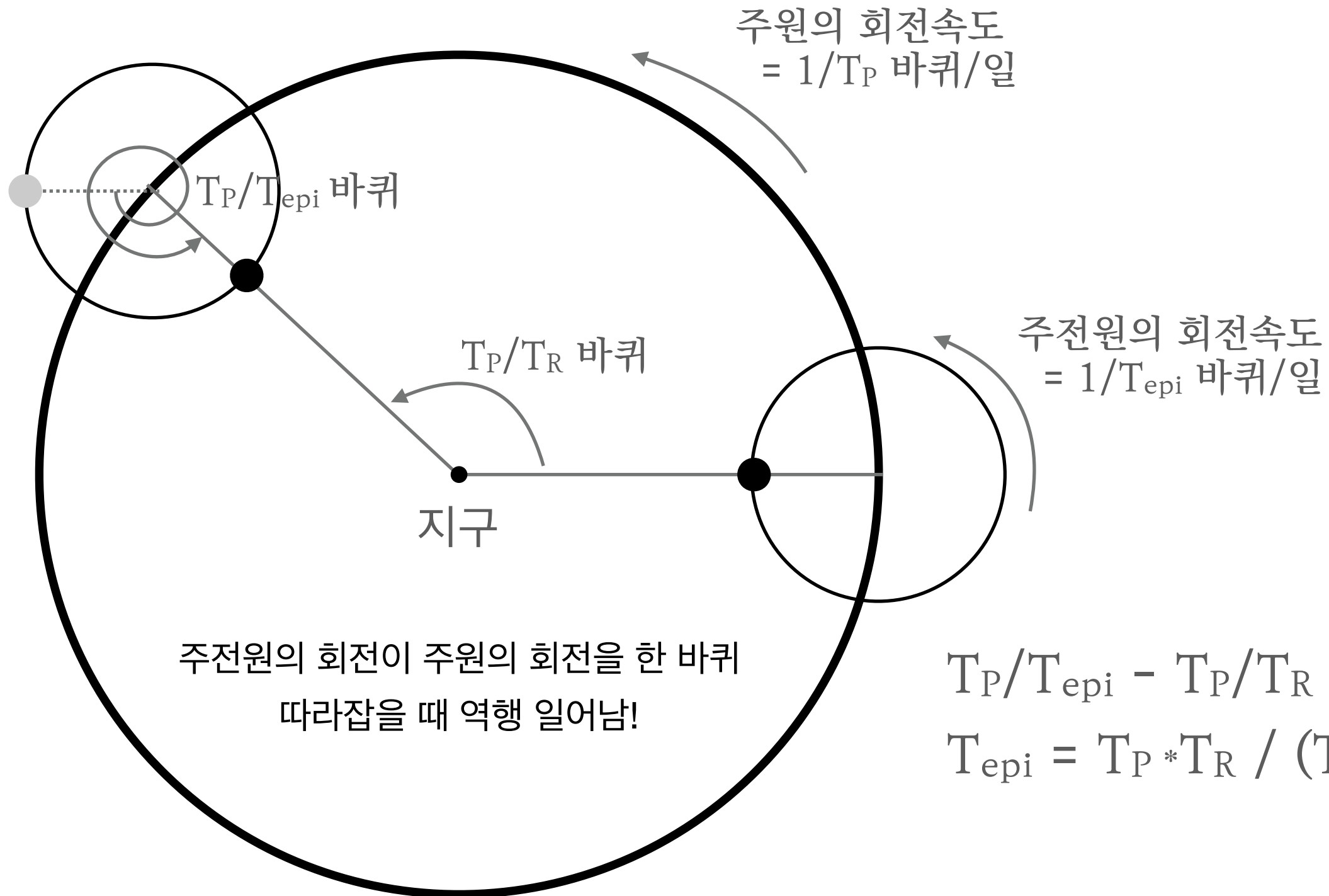
---





# 주전원( $T_{epi}$ )의 주기 계산

---



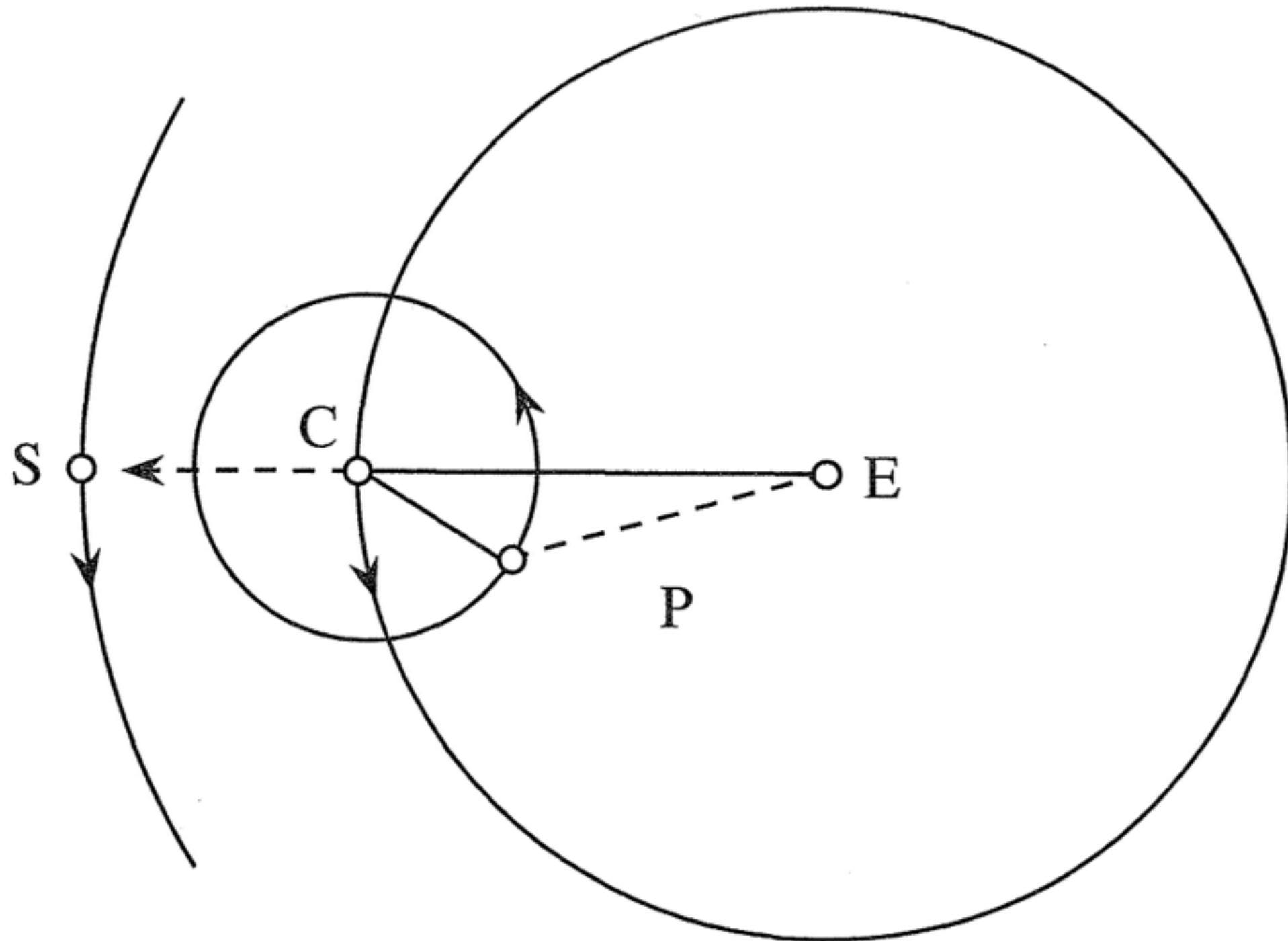
# 주전원의 주기 계산 결과

	황도 주기( $T_P$ )	역행 주기( $T_R$ )	주전원의 주기( $T_{\text{epi}}$ )
수성	1년	116일	88일
금성	1년	584일	225일
태양	1년	-	-
화성	687일	780일	1년
목성	12년	399일	1년
토성	30년	378일	1년



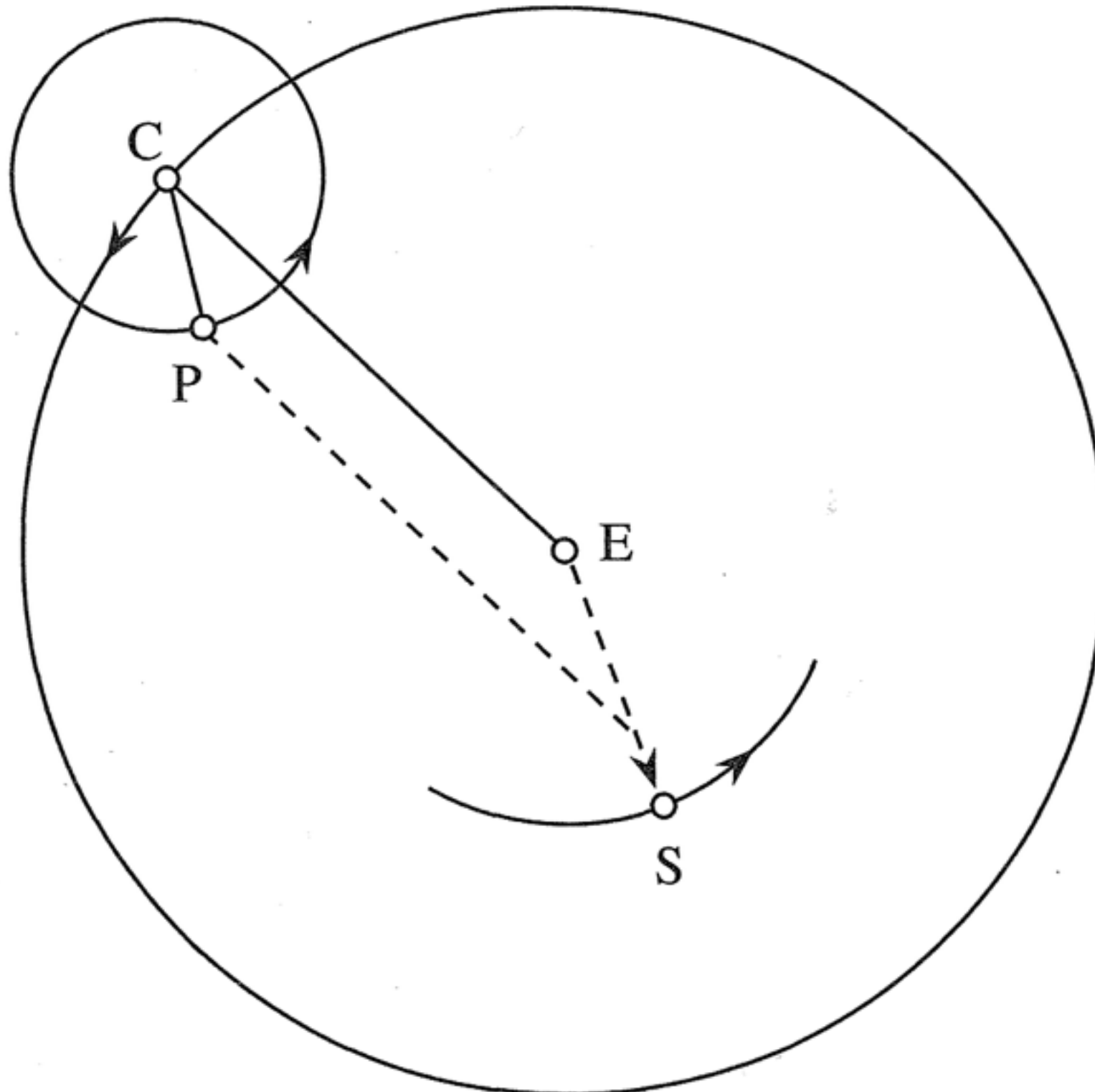
# 내행성과 태양 : 주원과 태양의 동기화

.....



# 외행성과 태양 : 주전원과 태양의 동기화

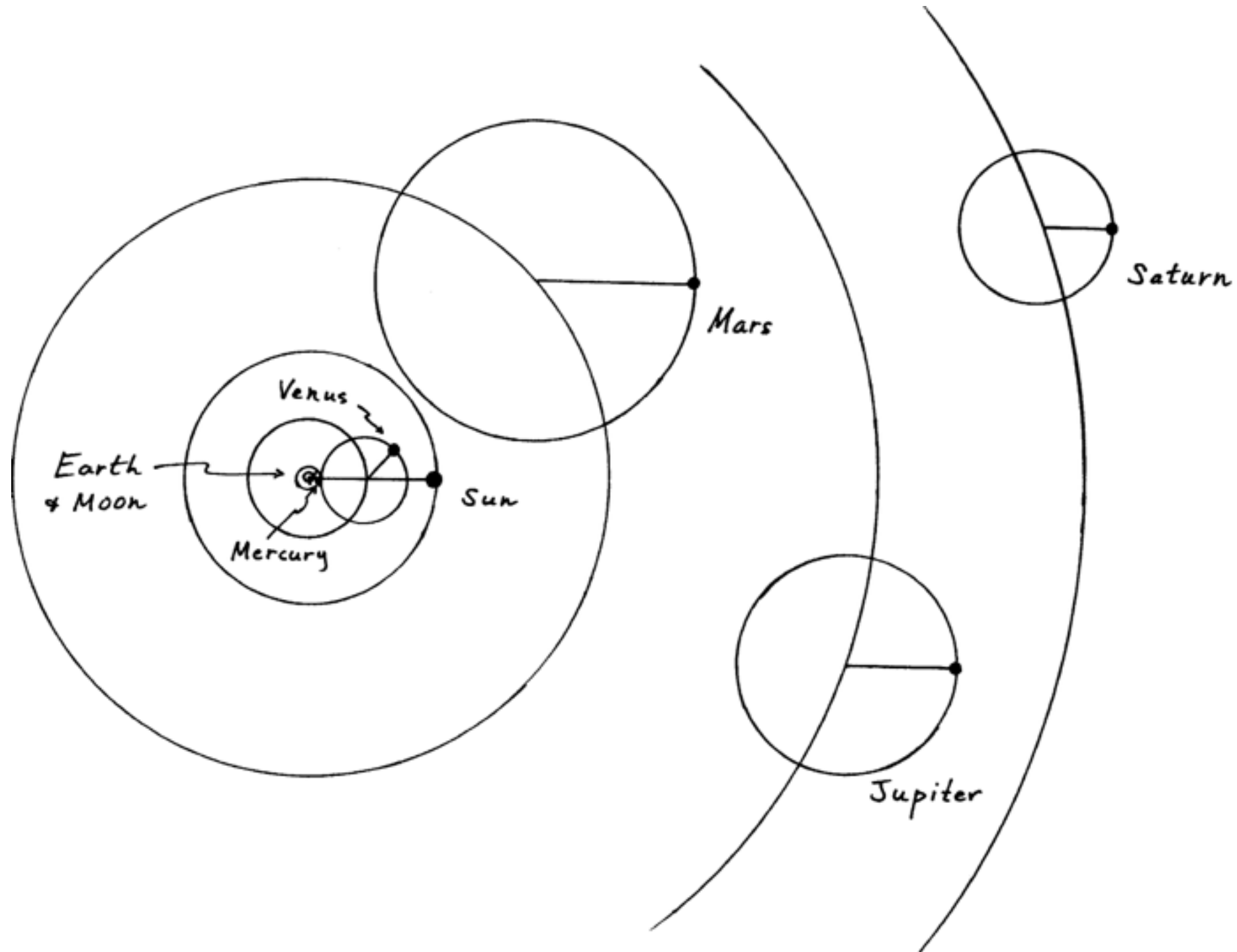
---





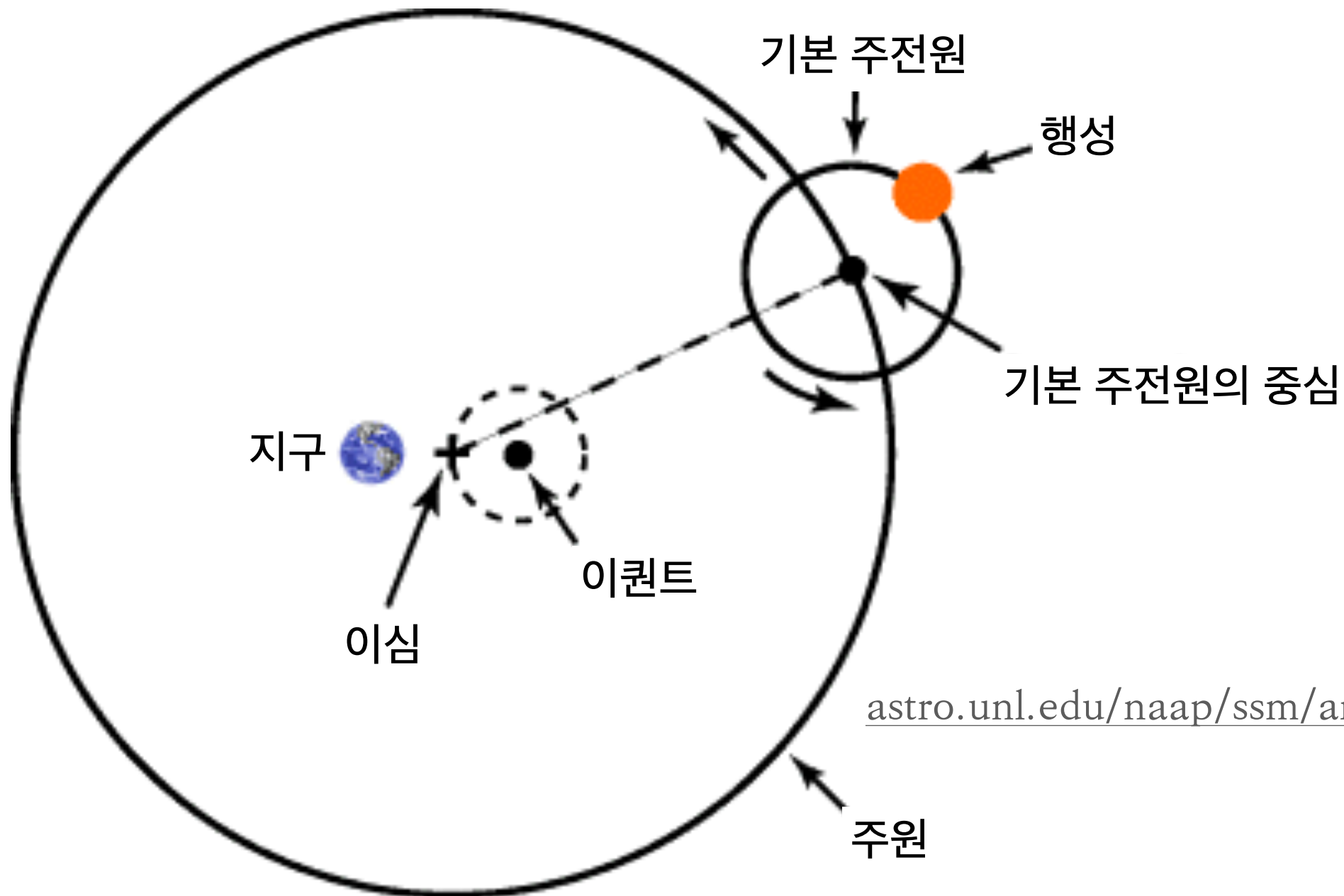
# 프톨레마이오스 체계

.....



# 행성에 대한 더 정교한 설명을 위해

주원-주전원 (질적 설명) + 이심원 & 이퀀트 (미세 조정)

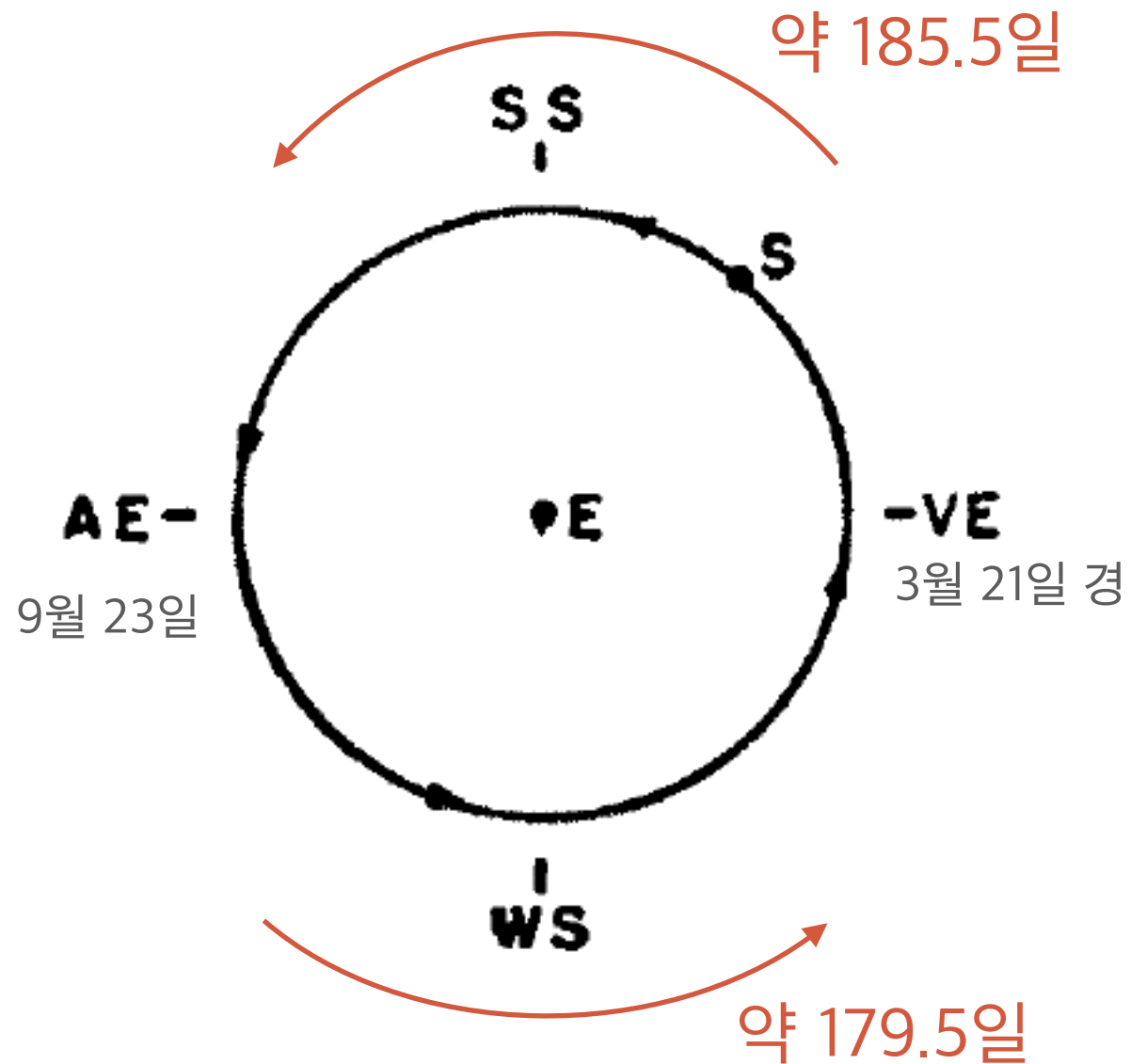


[astro.unl.edu/naap/ssm/animations/ptolemaic.swf](http://astro.unl.edu/naap/ssm/animations/ptolemaic.swf)

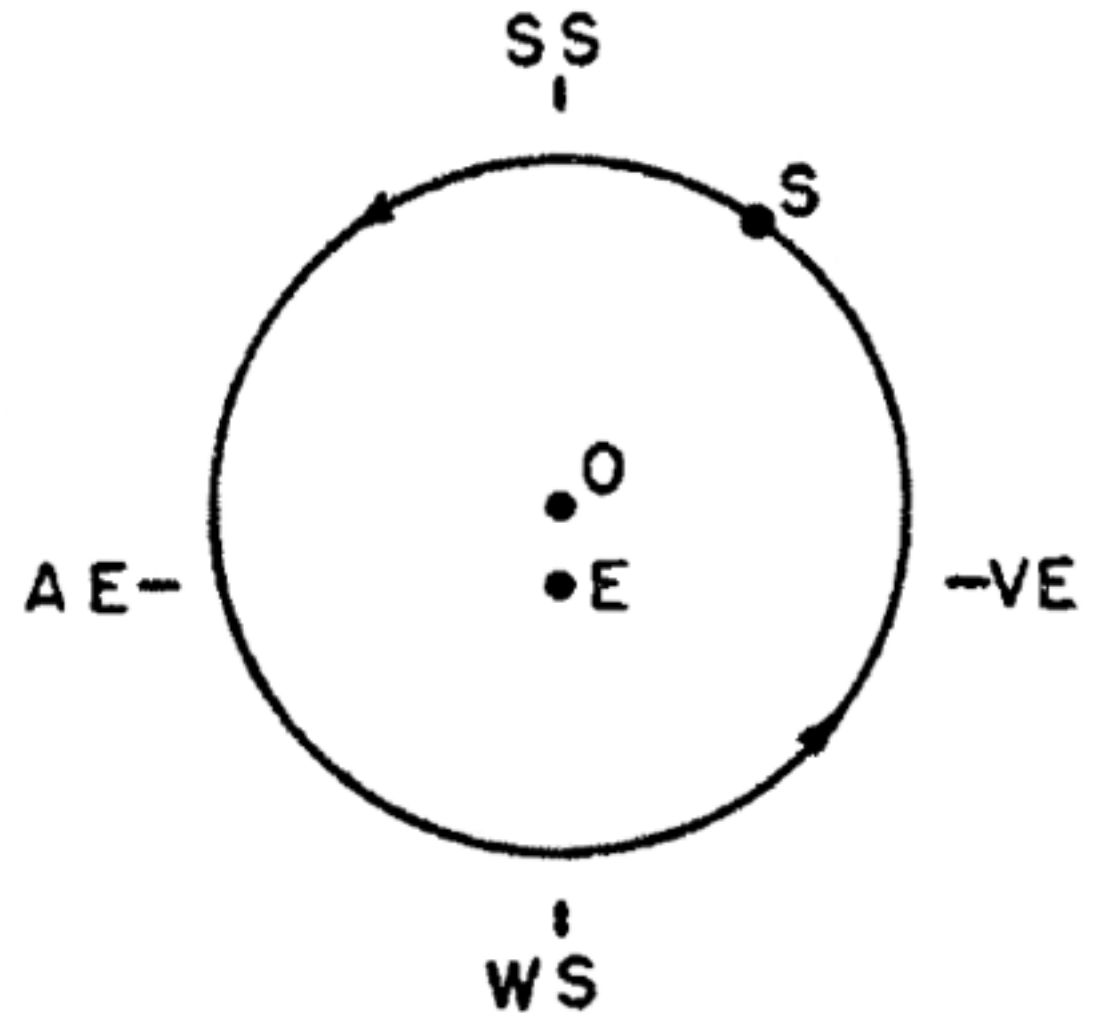


# 이심 : 지구는 행성 운동의 정확한 중심이 아님!

---



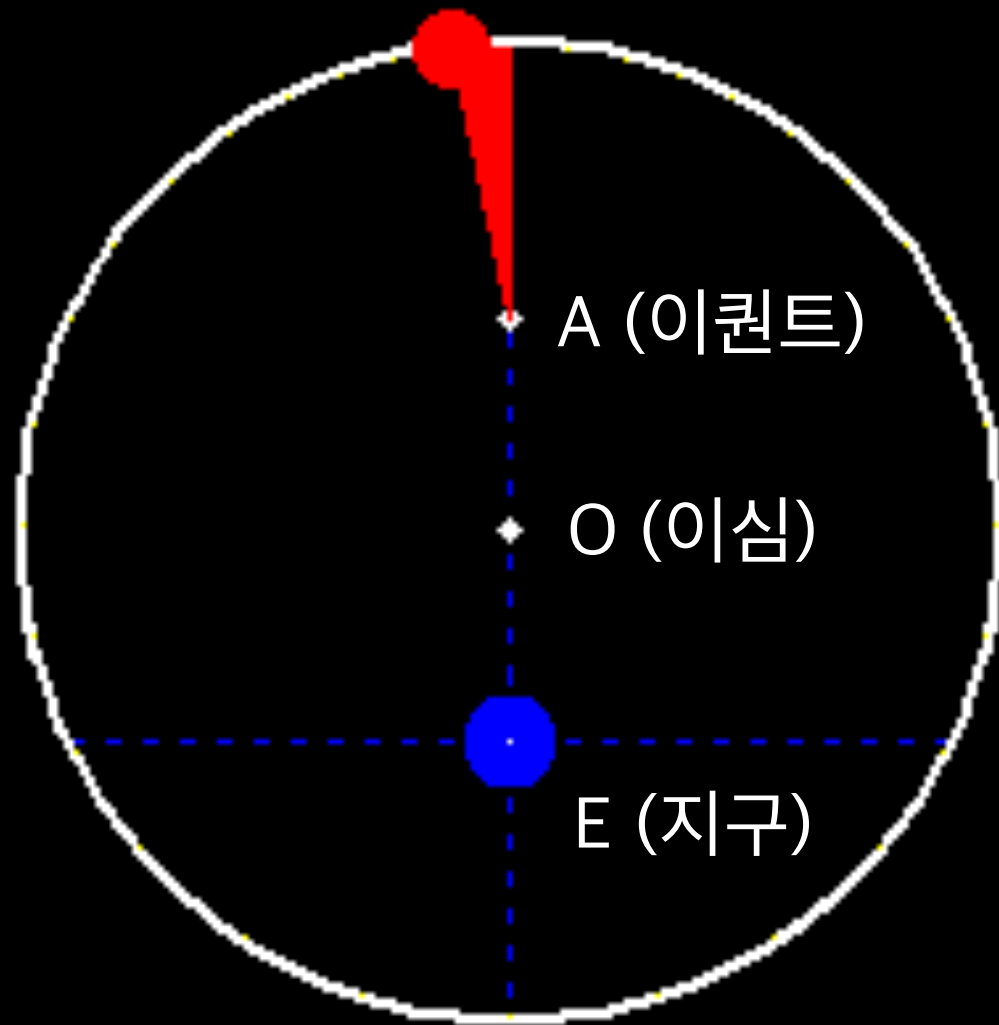
지구 중심의 단일 주원 위의 태양



이심원 위의 태양

# 이퀼트 : 행성은 원주 위에서 부등속 운동!

---



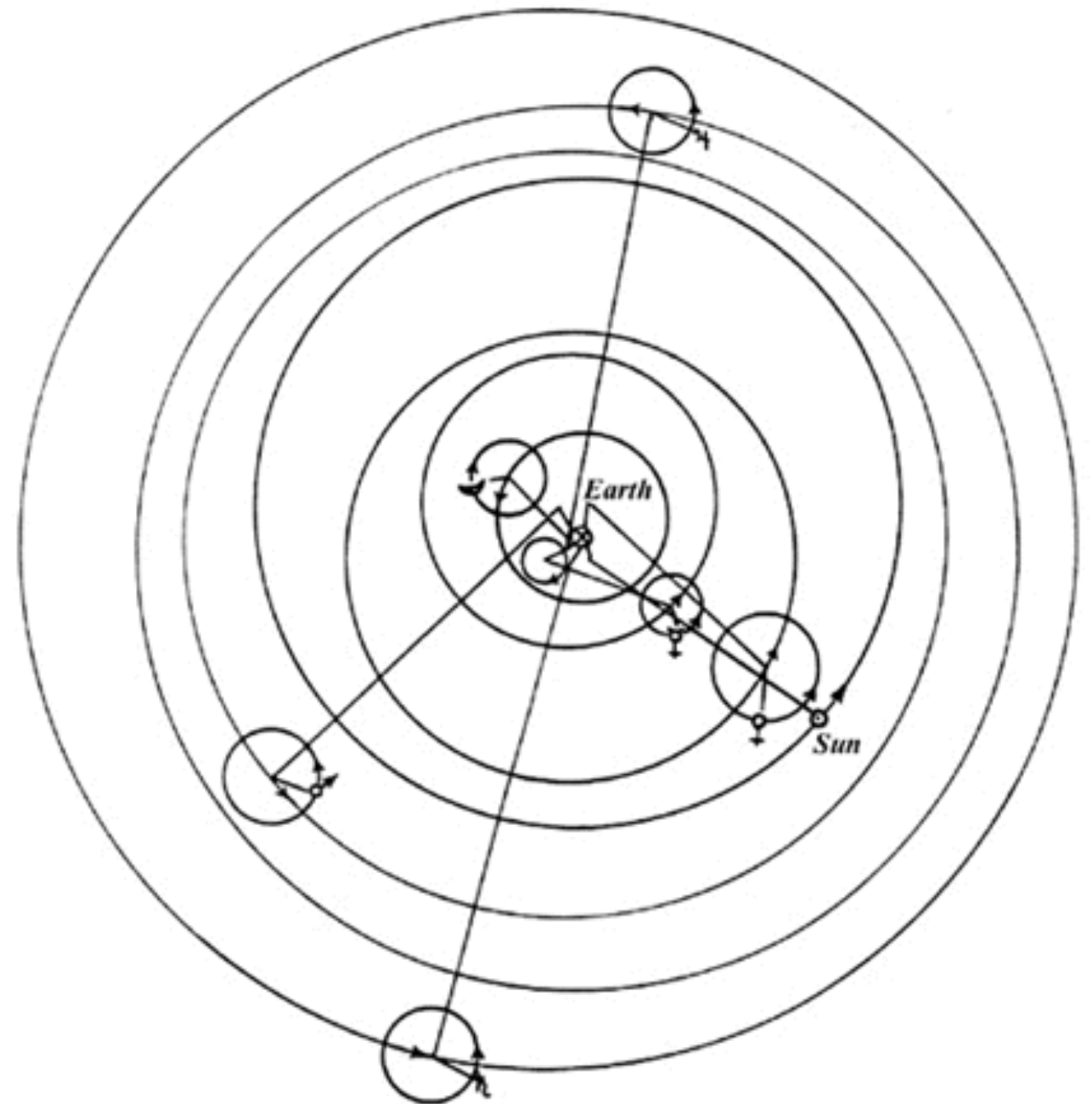
행성은 이심 O를 중심으로 한 위에서 움직이지만, 이심 O 대신 이퀼트 A를 중심으로 한 각속도가 일정하게 유지

행성은 원주 위에서 부등속 운동!

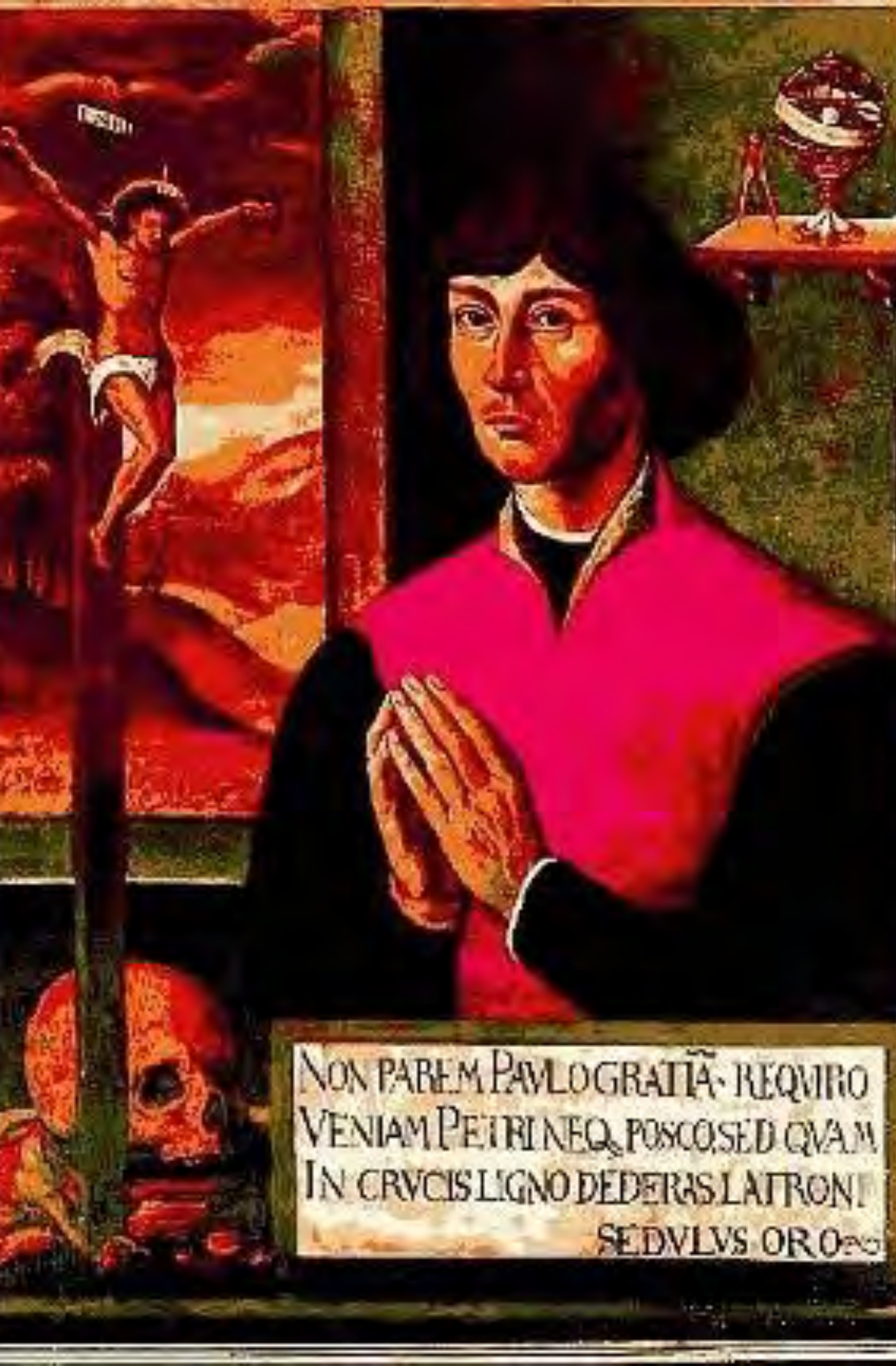
# 프톨레마이오스의 《알마게스트》

---

- ▶ 모든 천체에 대한 완전하고, 상세하고, 정량적인 설명
- ▶ 아리스토텔레스 물리학/우주론과의 부분적 부조화
  - ▶ 엄밀히 말하자면 행성들은 지구를 중심으로 한 등속 원운동을 하지 않음
  - ▶ 주전원을 돌려주는 메커니즘은?
- ▶ 프톨레마이오스를 비롯한 헬레니즘 천문학자들은 천체 운동의 물리적 메커니즘을 설명하는 데 무관심!
- ▶ 천문학의 목적 : 현상을 구제하기!







## 코페르니쿠스(1473-1543)

.....

- ▶ 폴란드 출신의 교회 행정가
- ▶ 폴란드의 크라쿠프 대학을 다닌 후 이탈리아의 볼로냐 대학에서 교회법 공부한 후 프라우엔부르크 성당 참사회원으로 활동
- ▶ 신플라톤주의의 영향
  - ▶ 우주의 신비를 풀 열쇠는 수학에!
  - ▶ 단순하고 조화로운 체계 추구
  - ▶ 태양 숭배 사상
- ▶ 1510년 경부터 지구가 태양 주위를 돈다고 생각
- ▶ 주변 친구들의 권유로 죽기 직전 1543년 《천구의 회전에 관하여》 출판



NICOLAI  
COPERNICI TO-  
RINENSIS DE REVOLVTIONI-  
bus orbium coelestium,  
Libri V. I.

IN QVIBVS STELLARVM ET FI-  
XARVM ET ERRATICARVM MOTVS, EX VETE-  
ribus atq; recentibus obseruationibus, restituit hic autor.  
(Præterea tabulas expeditas luculentasq; addidit, ex quib-  
us eisdem motus ad quoduis tempus Mathe-  
maticum studiosus facillime calcu-  
lare poterit.)

ITEM DE LIBRIS REVOLVTIONVM NICOLAI  
Copernici Narratio prima per M. Georgium Joachi-  
mum Rheticum ad D. Ioan. Schone-  
rum scripta.



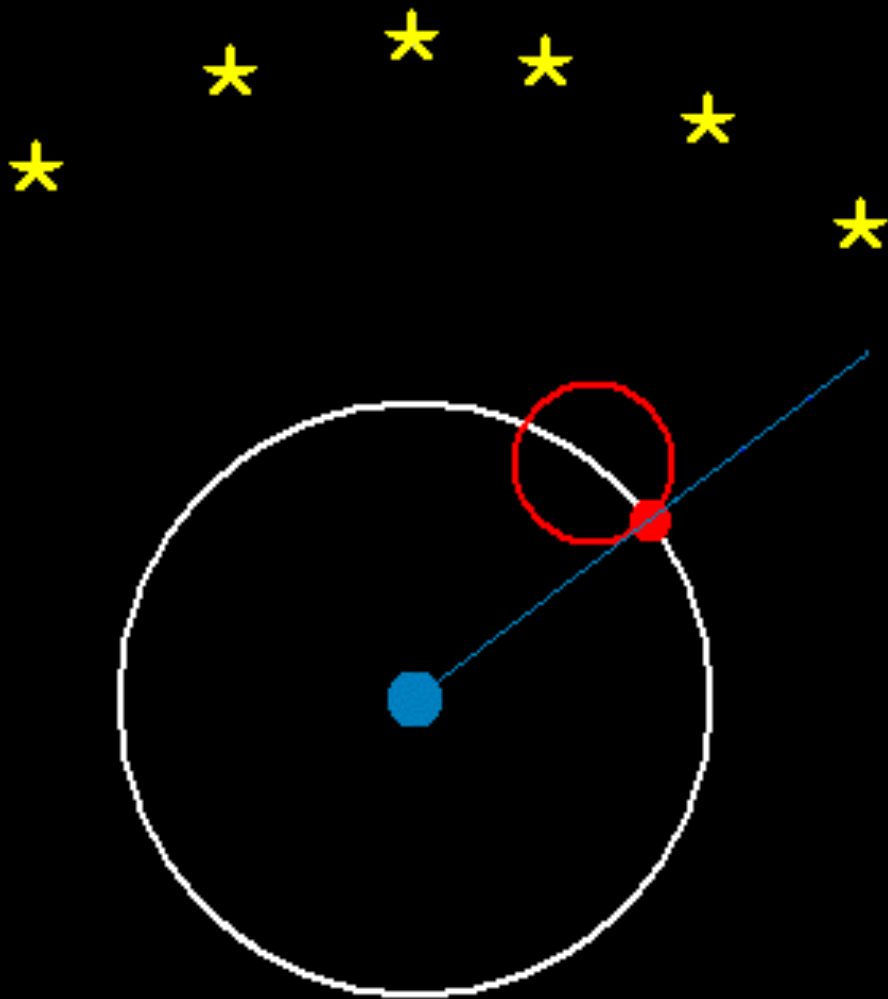
Cum Gratia & Privilegio Cæs. Maiest.  
BASILEAE, EX OFFICINA  
HENRICI PETRI.

## 《천구의 회전에 관하여》(1543)

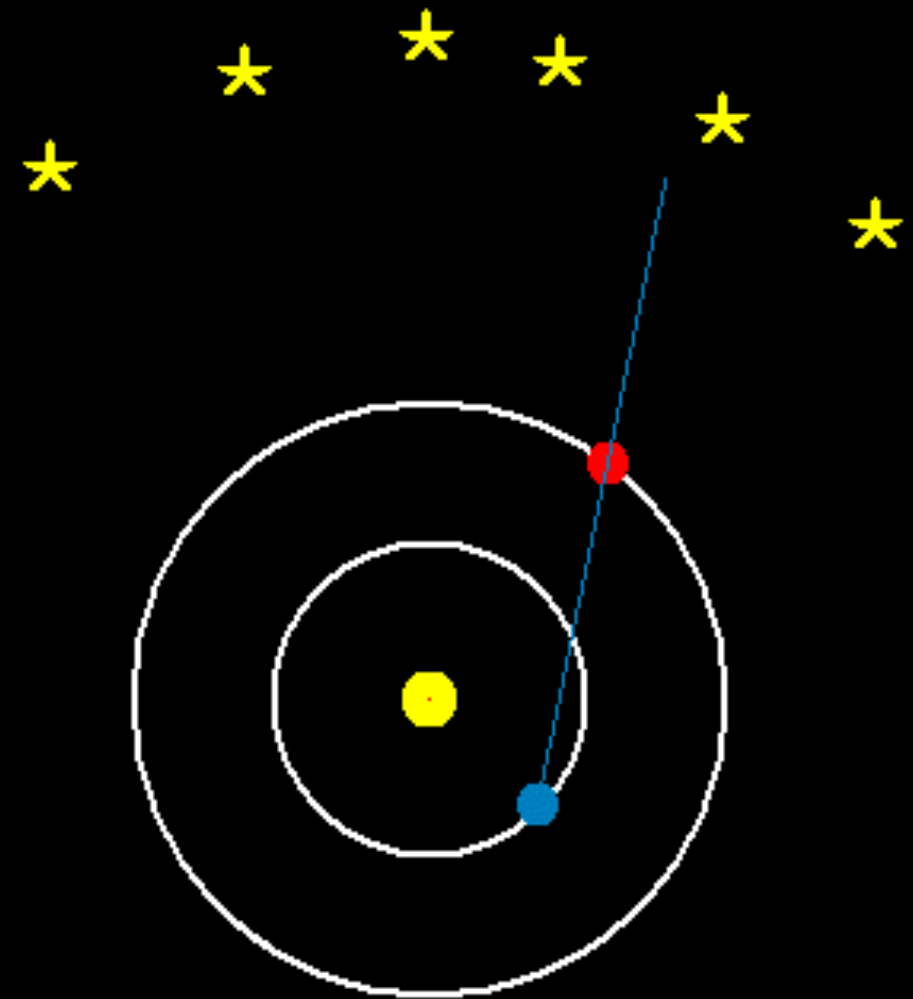
- ▶ 지구의 운동을 제외하면 전문적인 수리 행성 천문학 서적
- ▶ “프톨레마이오스의 체계는 괴물”
  - ▶ 이질적 원리 조합 : 우주의 조화와 대칭성 훼손. 특히 이퀼트의 사용에 대해 불만
  - ▶ 태양을 중심에 두면 조화롭고 간단한 체계 가능하다고 주장
  - ▶ 코페르니쿠스는 프톨레마이오스보다 더욱 엄격하게 등속 원운동의 조합만으로 모든 행성의 운동을 설명하고자 노력함

# 행성의 역행 운동 : 기본 주전원의 제거

---



프톨레마이오스



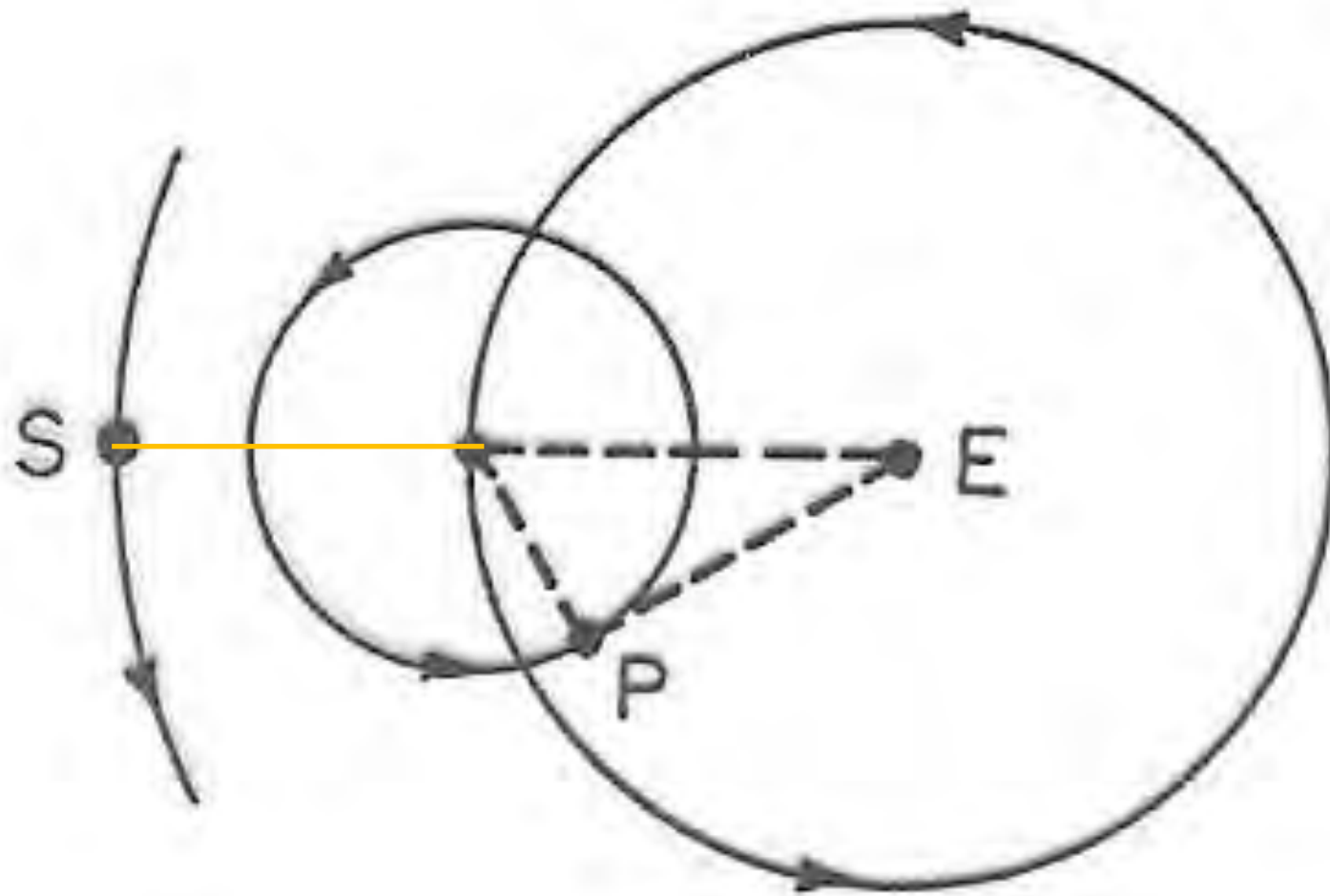
코페르니쿠스



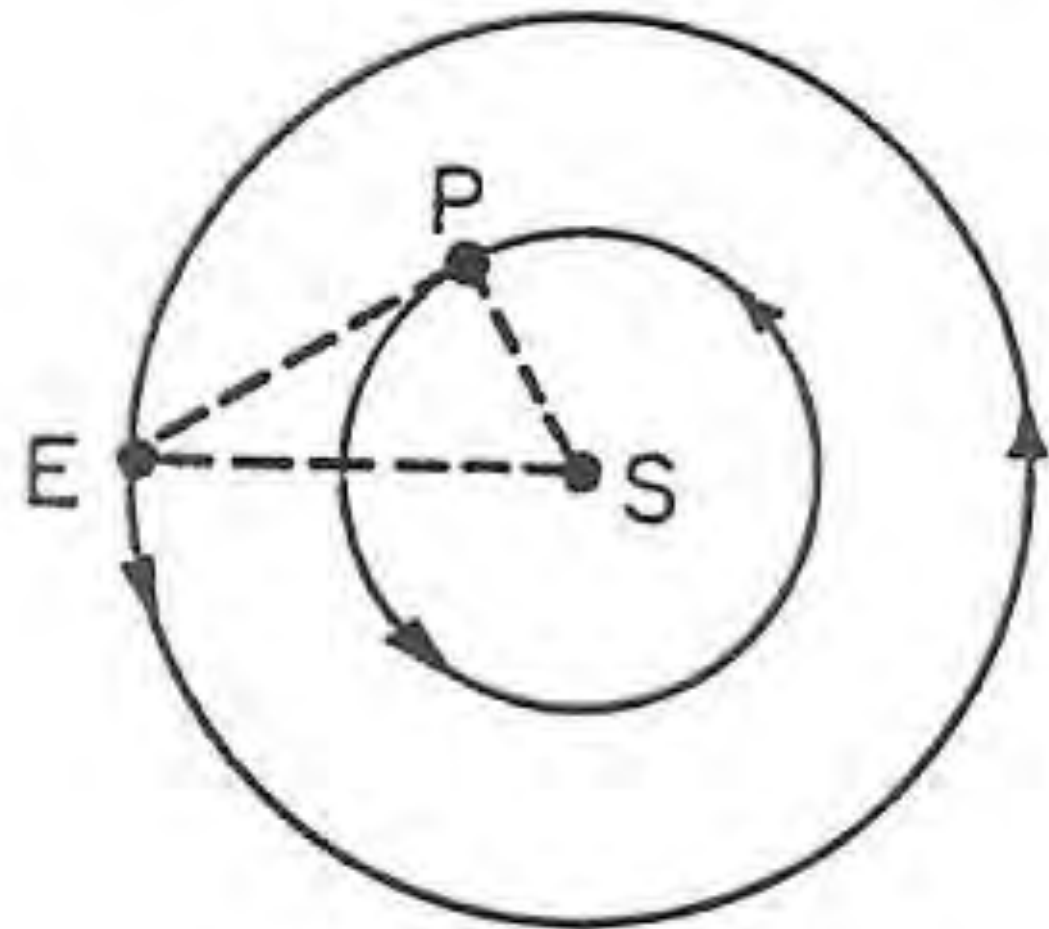
# 내행성의 최대이각 : 별도의 가정의 제거

---

프톨레마이오스

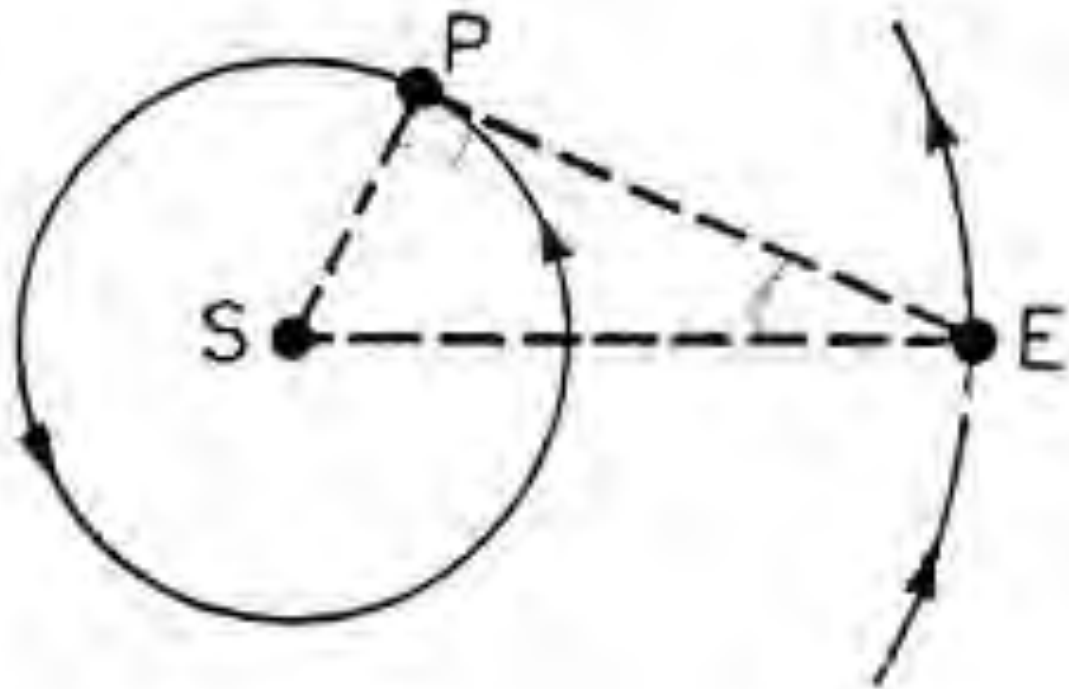


코페르니쿠스

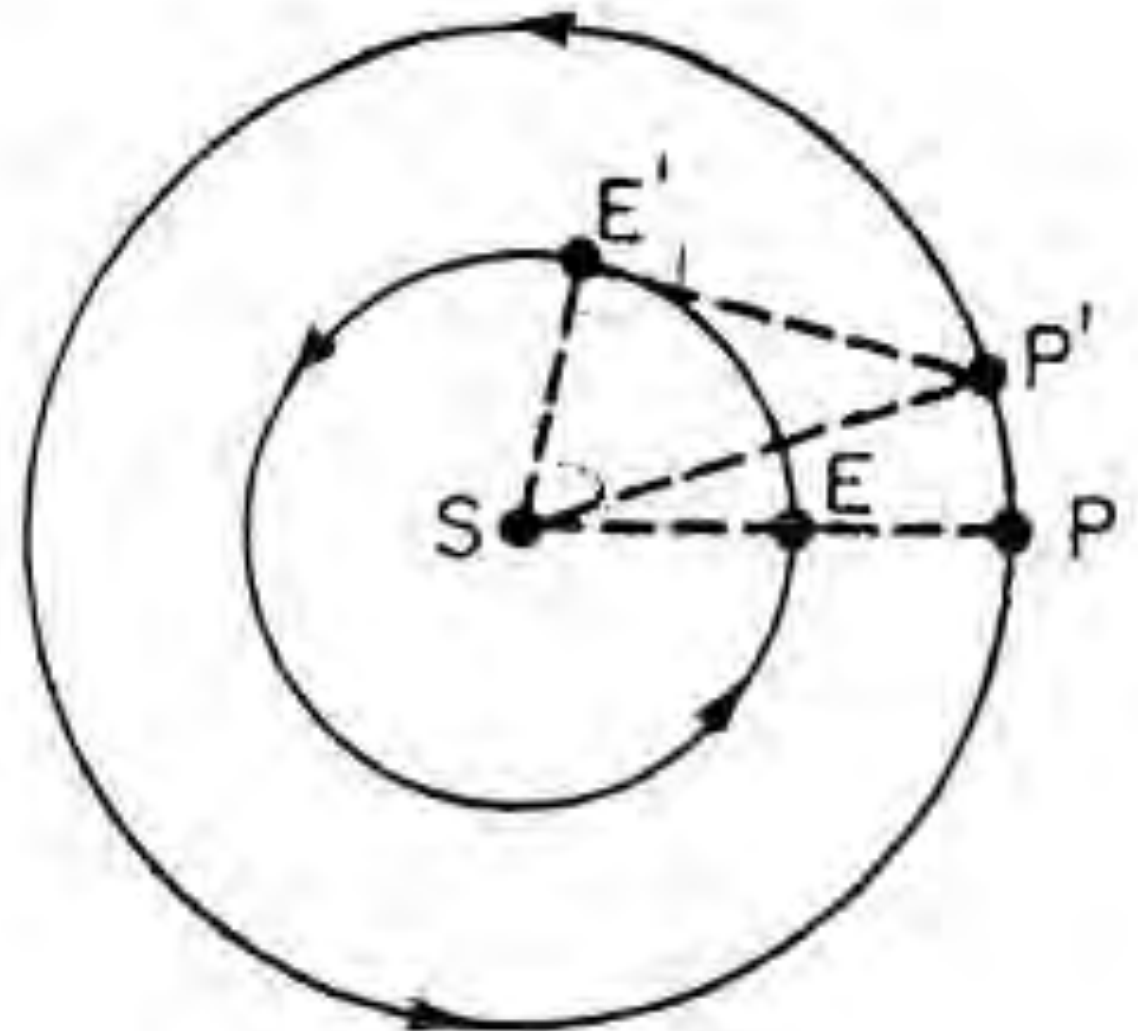


# 행성 궤도의 크기와 순서의 확정

.....



내행성의 경우



외행성의 경우

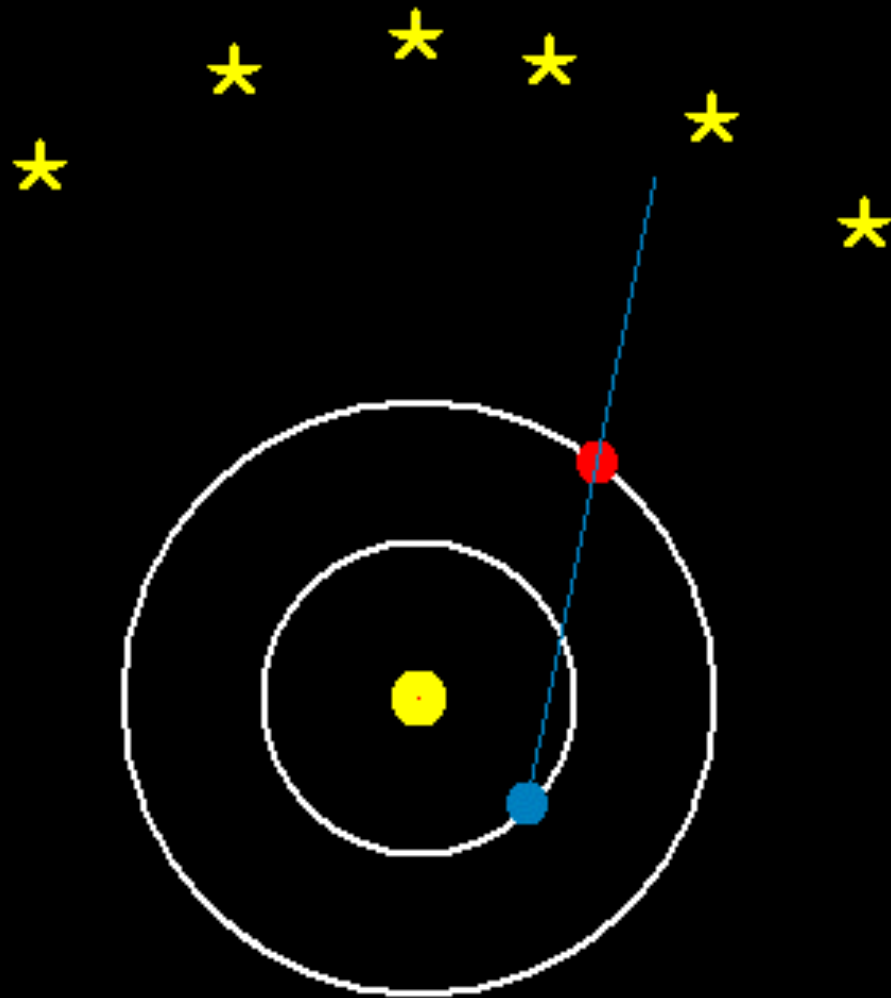
# 행성의 공전 주기와 궤도 크기의 조화

	공전 주기	궤도 반경
수성	88일	0.4
금성	225일	0.72
지구	1년	1
화성	687일	1.5
목성	12년	5.2
토성	30년	9.5



## 코페르니쿠스 체계의 장점

이미 알고 있었던 것들에 대한  
보다 조화롭고 단순한 설명들



- (1) 행성의 역행 운동
- (2) 내행성의 최대 이각
- (3) 행성 궤도의 순서와 크기
- (4) 역행 운동의 크기와 횟수
- (5) 역행 운동과 태양의 관계
- (6) 화성의 유난스러운 밝기 변화

“이 모든 현상은 동일한 원인에 의해 일어나는 것들로,  
그 원인은 바로 지구의 운동이다.” - 코페르니쿠스

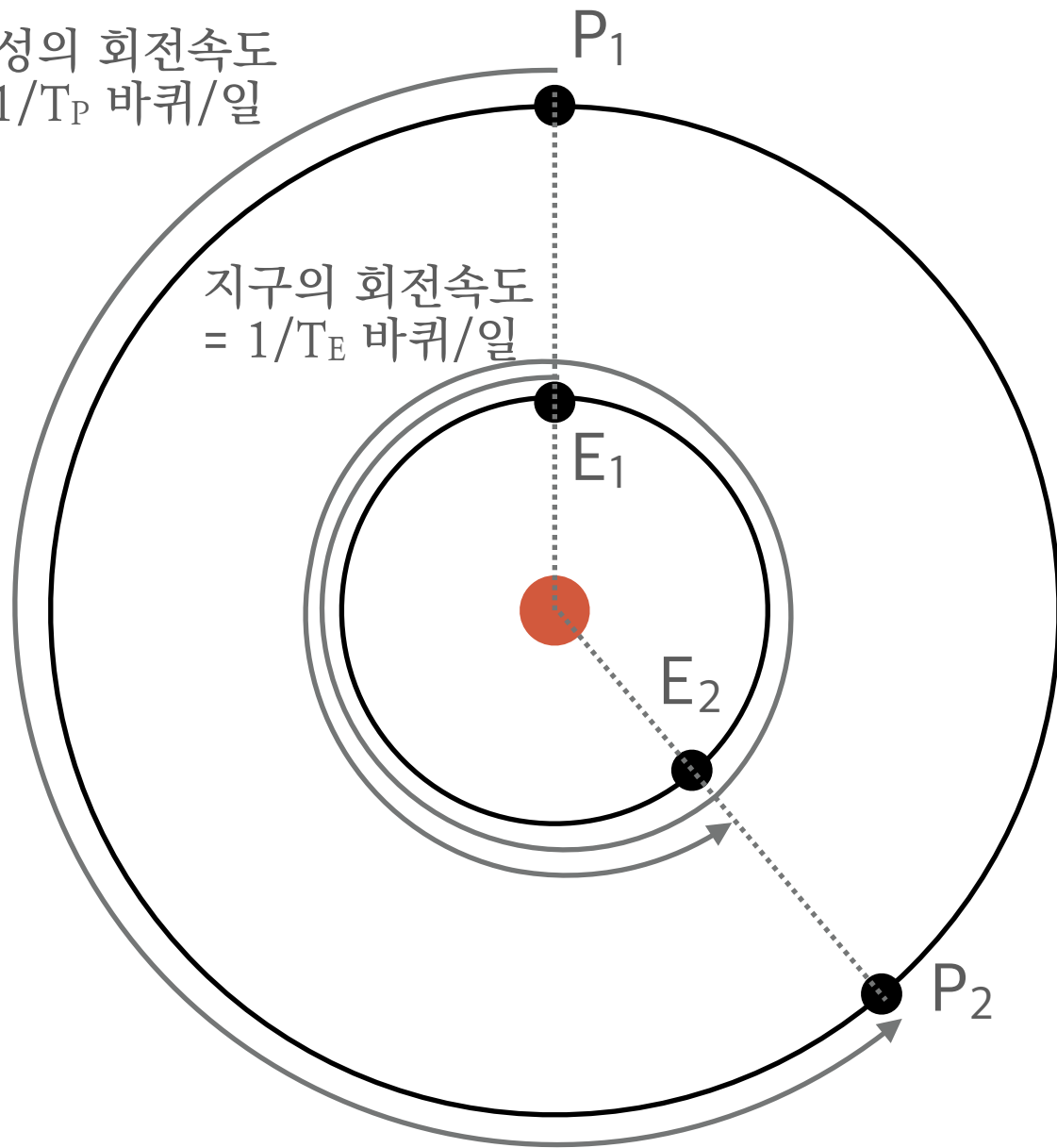
“

태양 중심 천문학의 진짜 호소력은 실용적인 면이 아닌 미적인 면에 있었[다] ... 천문학자들에게 코페르니쿠스 체계와 프톨레마이오스 체계 사이의 선택은 처음에는 단지 취향의 문제일 수 있었[다].

토머스 쿤, 《코페르니쿠스 혁명》 중에서

행성의 회전속도  
=  $1/T_P$  바퀴/일

지구의 회전속도  
=  $1/T_E$  바퀴/일



1번 역행부터 2번 역행까지의 시간( $T_R$ ) 동안  
지구(E)는 행성(P)보다 한 바퀴를 더 돌게 된다

$$T_R/T_E - T_R/T_P = 1 \text{ 바퀴}$$

↑  
지구의  
회전바퀴

↑  
행성의  
회전바퀴

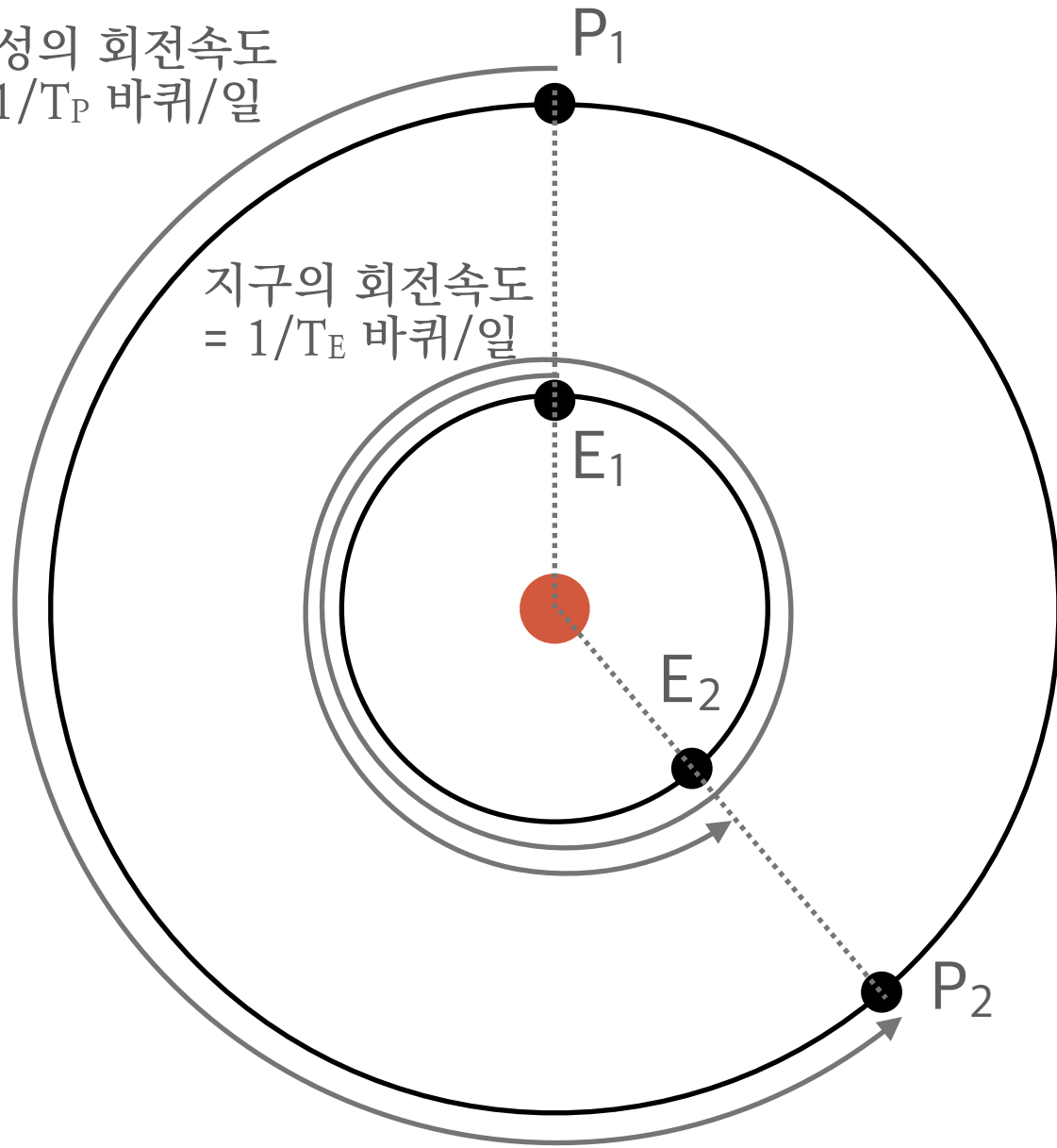
## 미적 조화, 단순성, 예측

- ▶ 코페르니쿠스 체계에서 외행성의 역행은 지구가 행성을 따라잡으면서 발생하는 겉보기 운동
- ▶ 역행은 언제나 외행성이 지구의 태양 반대편에 있을 때에만 발생한다는 것을 관측 없이 예측
- ▶ 각 행성의 역행 주기도 지구와 행성의 공전 주기로부터 예측  
$$T_R = T_E \cdot T_P / (T_P - T_E)$$
- ▶ 역행 주기의 이론적 예측치와 관측치 비교를 통한 시험 가능!
- ▶ 이러한 예측에 의한 시험은 흔히 매우 좋은 증거를 제공한다고 얘기됨



행성의 회전속도  
=  $1/T_P$  바퀴/일

지구의 회전속도  
=  $1/T_E$  바퀴/일



1번 역행부터 2번 역행까지의 시간( $T_R$ ) 동안  
지구(E)는 행성(P)보다 한 바퀴를 더 돌게 된다

$$T_R/T_E - T_R/T_P = 1 \text{ 바퀴}$$

↑  
지구의  
회전바퀴

↑  
행성의  
회전바퀴

## 역행 주기 예측치와 관측치 비교

.....

화성의 역행 주기

$$= 687 \times 365 / (687 - 365)$$

$$= 778 \text{ 일 (관측치 780 일)}$$

목성의 역행 주기

$$= 12 \times 1 / (12 - 1)$$

$$= 1.09 \text{ 년}$$

$$= 398 \text{ 일 (관측치 399 일)}$$

토성의 역행 주기

$$= 29 \times 1 / (29 - 1)$$

$$= 1.04 \text{ 년}$$

$$= 378 \text{ 일 (관측치 378 일)}$$

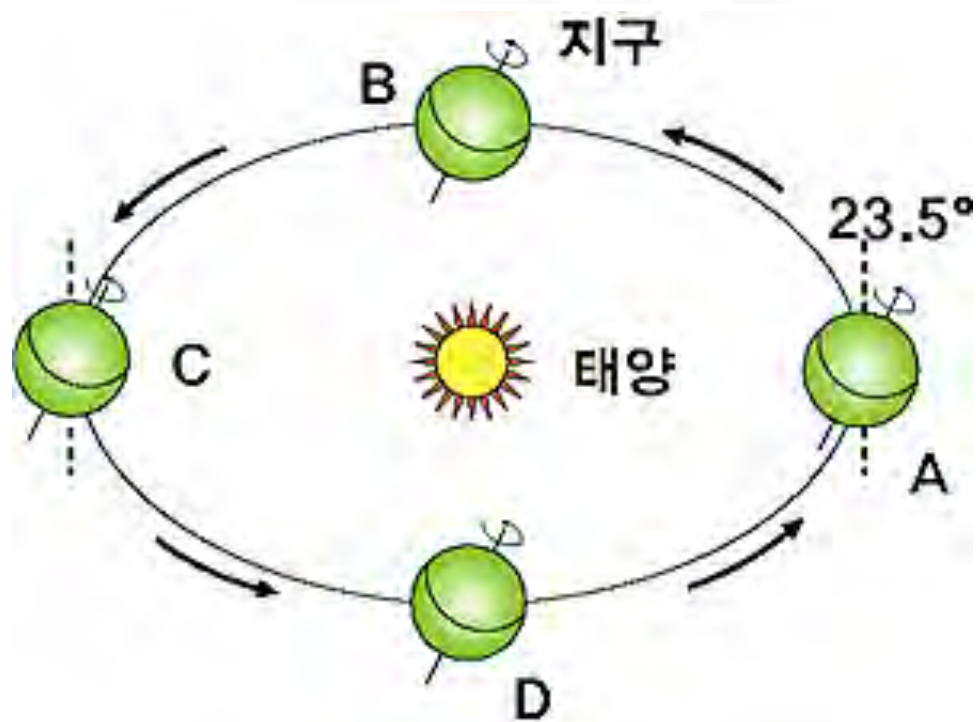
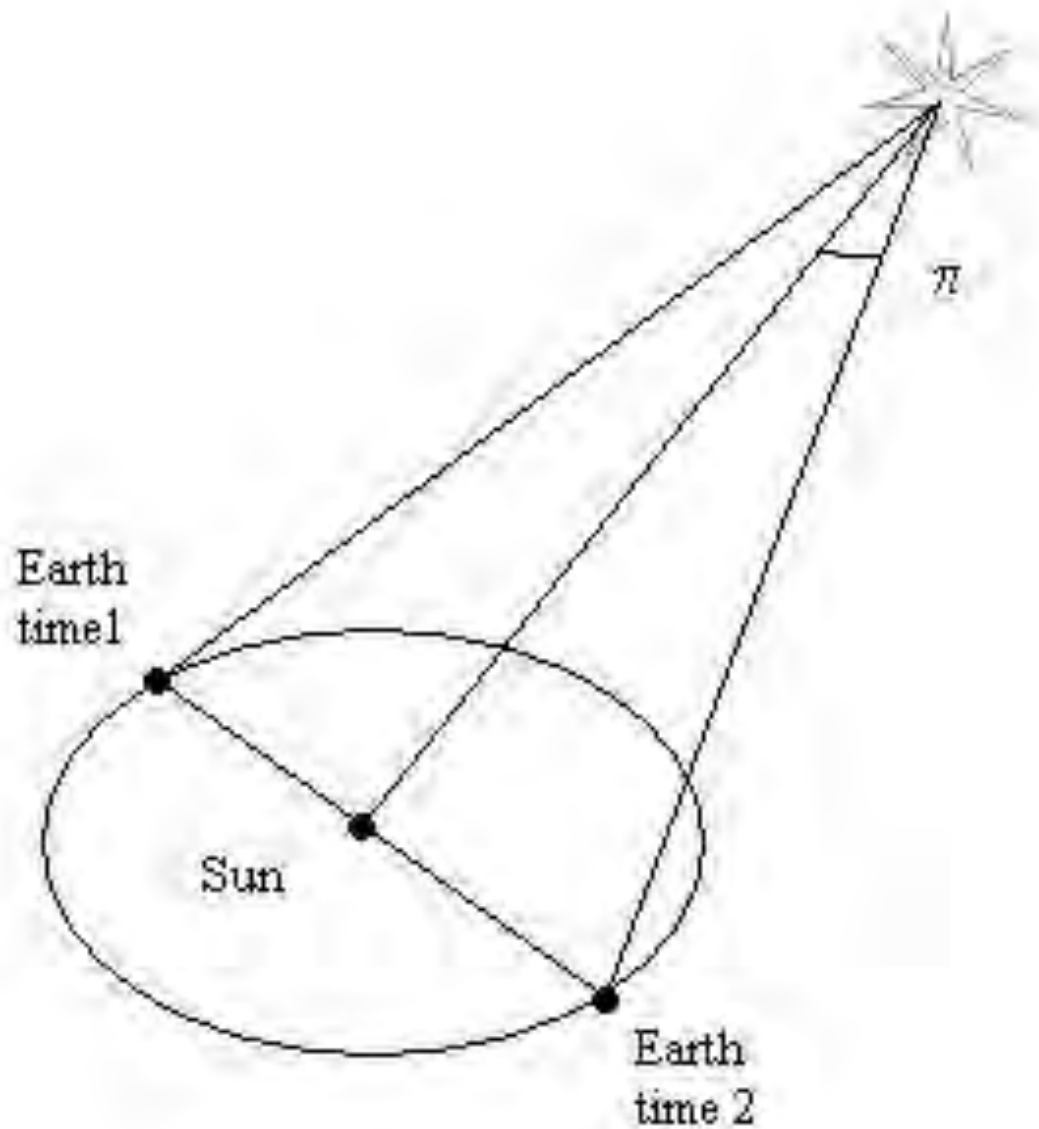


## 코페르니쿠스 체계의 복잡성과 부정확성

- ▶ 태양 중심의 단순한 원형 궤도는 행성 운동에 대한 단순한 정성적 설명은 제공하지만 상세한 정량적 설명은 제공하지 못함.
- ▶ 코페르니쿠스에게 행성의 운동은 등속 원운동이므로, 관측과의 일치를 위해 그는 다수의 **미세 주전원**과 **이심원**을 사용하여 매우 복잡한 체계를 만들어냈다.
- ▶ 사실 원운동의 합성이라는 그의 방법은 프톨레마이오스 체계보다 월등히 정확한 체계를 만들 수 없었음.

# 연주시차의 관측 실패

- ▶ 지구가 태양을 중심으로 공전한다면, 계절에 따라 별의 위치가 바뀌어야 한다는 예측이 따라나옴. 일례로, 여름과 겨울의 북극성이 달라져야!
- ▶ 그러나 그러한 시차는 관측되지 않음!
- ▶ 태양중심설에 대한 반증?
- ▶ 아니면 광활한 우주?





## 더 심각한 문제들

.....



- ▶ 지구의 회전에 따른 물리적 문제
  - ▶ 우리는 왜 어지럽지 않은가
  - ▶ 우리는 왜 날아가버지 않는가?
  - ▶ 위로 쏘아올린 화살은 왜 뒤쳐지지 않고 제자리에 돌아오는가?
- ▶ 지구가 천상계의 일원이 됨에 따른 지상계/천상계 구분의 파괴
  - ▶ 무거운 물체는 왜 우주의 중심이 아닌 지구로 떨어지는가?
  - ▶ 지옥은 어디에 있는가?
- ▶ 코페르니쿠스의 해법 : 초보적인 관성 개념과 중력 개념 제안. 그러나 설득력 거의 없었음.

“

모든 것의 한가운데에 태양이 왕좌 위에 앉아 있다. 이 가장 아름다운 사원에서 이 빛나는 옥체가 전체를 한꺼번에 밝힐 수 있는 곳이 이곳 말고 어디에 있겠는가? 그는 우주의 등불, 우주의 정신, 우주의 통치자로 불리기도 하는데, 이는 상당히 적절한 이름이다. ... 따라서 태양은 그 주위를 돌고 있는 그의 자식들, 즉 행성들을 통치하는 왕좌에 ‘앉아 있다’.

코페르니쿠스, 《천구의 회전에 관하여》, 1권 중에서

# 결론

---

- ▶ 《천구의 회전에 관하여》는 혁명적인 저작이라기보다 혁명을 야기한 저작
- ▶ 지구의 운동만 제외하면 프톨레마이오스의 틀 안에 갇혀 있었음.
  - ▶ 등속 원운동의 조합으로 행성 운동 설명
  - ▶ 미세 주전원, 이심의 사용
  - ▶ 수정체 천구 개념에 대한 믿음
- ▶ 조화롭다는 장점 있었지만, 완성된 체계는 단순하지도 정확하지도 않음
- ▶ 코페르니쿠스 체계는 새로운 문제들을 야기
  - ▶ 연주시차 측정 실패
  - ▶ 지구의 자전과 공전에 따른 물리적 문제들
  - ▶ 이 문제들을 해결하는 과정에서 코페르니쿠스 혁명 완성